

УДК621.9.06.-229.331

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
А.А ЯКИМОВ, д-р техн. наук, Одесса, Украина

РАСЧЕТ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

Виявлено шляхи зниження амплітуди коливань, що виникають при шліфуванні переривчастими кругами, за рахунок зменшення величини відношення часу роботи ріжучого виступу до періоду власних коливань пружної системи шліфувального верстата. Виявлені закономірності зниження температури і тангенціальної складової сили різання при збільшенні кількості западин на робочій поверхні переривчастого абразивного інструменту. Обґрунтовано доцільність заміни переривчастих кругів з великим числом прорізів на робочій поверхні на високопористі круги.

Выявлены пути снижения амплитуды колебаний, возникающих при шлифовании прерывистыми кругами, за счет уменьшения величины отношения времени работы режущего выступа к периоду собственных колебаний упругой системы шлифовального станка. Выявлены закономерности снижения температуры и тангенциальной составляющей силы резания при увеличении количества впадин на рабочей поверхности прерывистого абразивного инструмента. Обоснована целесообразность замены прерывистых кругов с большим числом прорезей на рабочей поверхности на высокопористые круги.

Identified ways to reduce the amplitude of oscillations induced by intermittent grinding circles, by reducing the ratio of operating time of the cutting lip to the period of natural oscillations of elastic system of the grinding machine. The regularities of the reduction temperature and the tangential component of the cutting force when the number of depressions on the working surface of an abrasive tool discontinuous. The expediency of replacing the broken circle with a large number of slots on the working surface in the highly porous wheels.

Постановка проблеми. Колебания, которые обусловлены прерываемостью процесса шлифования, изменяют условия динамического взаимодействия инструмента и детали. Изменение условий

© В.М. Тонконогий, А.А Якимов, 2015

взаимодействия абразивного прерывистого круга и заготовки может оказывать как позитивное, так и негативное влияние на формирование качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. Для оценки этого влияния необходимо знать величину амплитуды колебаний.

Основной материал исследований. Для уточненного расчета амплитуды колебаний при прерывистом резании воспользуемся аналитическим решением, приведенным в работе [1]. Расчетная схема периодического воздействия импульсов на упругую систему показана на рис. 1.

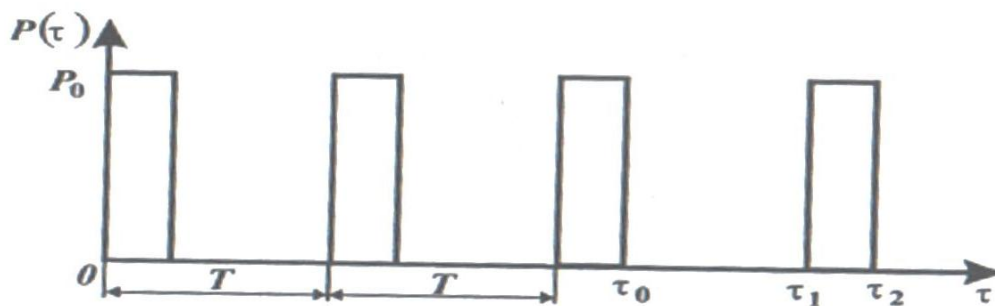


Рисунок 1 – Изменение периодической силы $P(\tau)$

Перемещение и скорость приведенной массы m в начальный момент времени равны y и \dot{y}_0 . До приложения следующего импульса система будет колебаться с собственной частотой k . Колебания системы описываются уравнением

$$y = y_0 \cdot \cos k\tau + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin k\tau. \quad (1)$$

Скорость перемещения

$$\dot{y} = -k \cdot y_0 \cdot \sin k\tau + \dot{y}_0 \cdot \cos k\tau. \quad (2)$$

В конце этого интервала, непосредственно перед следующим импульсом (по времени τ_1), получим

$$y_1 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (3)$$

$$\dot{y}_1 = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT. \quad (4)$$

В результате действия очередного импульса скорость мгновенно изменится на величину S/m (где S – значение импульса).

После второго импульса величина перемещения приведенных масс и скорости их движения определяется в виде следующих выражений:

$$y_2 = y_1 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (5)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_1 + \frac{S}{m} = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT + \frac{S}{m}. \quad (6)$$

Импульсы вызывают переодические движения упругой системы с постоянным периодом. Поэтому величины y_2 и \dot{y}_2 будут соответственно равны y_0 и \dot{y}_0

$$y_2 = y_0 = y_0 \cdot \cos kT + \frac{\dot{y}_0}{k} \cdot \sin kT, \quad (7)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_0 = -k \cdot y_0 \cdot \sin kT + \dot{y}_0 \cdot \cos kT + \frac{S}{m}. \quad (8)$$

Система уравнений содержит две неизвестные величины: y_0 и \dot{y}_0 . Решая систему уравнений, находим

$$y_0 = \frac{S}{2 \cdot m \cdot k} \cdot \operatorname{ctg} \frac{kT}{2}, \quad (9)$$

$$\dot{y}_0 = \frac{S}{2 \cdot m}. \quad (10)$$

С учетом $T = 2\pi/\omega$ (где ω – частота возмущающей силы) закон движения (1) примет вид

$$y = \frac{S \cdot \left[\sin k\tau + \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right) \cdot \cos k\tau \right]}{2 \cdot m \cdot k}. \quad (11)$$

Амплитуда колебаний определится

$$A = \frac{S \cdot \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right)}}{2 \cdot m \cdot k} = \frac{S}{\left[2 \cdot m \cdot k \cdot \left| \sin \left(\frac{\pi \cdot k}{\omega} \right) \right| \right]} \quad (12)$$

Дробь $S/(m \cdot k)$ – есть максимальное отклонение режущей кромки инструмента, вызванное однократным импульсом. Выражение

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot \left| \sin \frac{\pi \cdot k}{\omega} \right|} \quad (13)$$

служит коэффициентом, отражающим влияние повторяемости импульсов.

На рис. 2 показано изменение коэффициента β в зависимости от отношения частот ω/k .

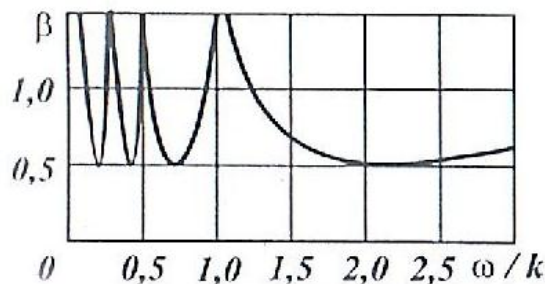


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента β от отношения частот ω/k

При совпадении вынужденной ω и собственной k частот или их кратности ($k = n \cdot \omega$, где $n = 1, 2, \dots$) возникает резонанс. Из зависимости (13) видно, что $\beta_{\min} = 0,5$.

Минимальное значение амплитуды колебаний A_{\min} при $\left| \sin \frac{\pi \cdot k}{\omega} \right|$ с учетом $S = P_0 \cdot \tau$ (где P_0 – значение силы; τ – время действия силы) и

$k = \sqrt{c/m}$ (где c – жесткость технологической системы) определяется таким образом:

$$A_{\min} = 0,5 \cdot A_{cm} \cdot \tau \cdot k, \quad (14)$$

где $A_{cm} = P_0/c$ – перемещение массы m , соответствующее статическому приложению силы P_0 .

С учетом $k = 2\pi/T$ зависимость (14) окончательно примет вид

$$A_{\min} = A_{cm} \cdot \frac{\pi \cdot \tau}{T}, \quad (15)$$

где T – период собственных колебаний.

Значение A_{\min} зависит от соотношения $\pi \cdot \tau/T$. При малой жесткости технологической системы период собственных колебаний системы относительно большой. Следовательно, уменьшая τ ($\pi \cdot \tau/T \ll 1$), можно существенно уменьшить амплитуду колебаний A_{\min} . Это эквивалентно повышению динамической жесткости системы. Значит, при кратковременном действии импульсов определенной продолжительности τ можно практически исключить упругие перемещения системы, приблизив фактическую производительность шлифования к номинальной. При этих условиях режущие зерна внедряются в металл на большую глубину. Создаются условия ударно-циклического взаимодействия связи шлифовального круга с металлом обрабатываемой детали, что способствует протеканию процесса самозатачивания и повышению стойкости и режущей способности абразивно-алмазных инструментов.

Процессы абразивной обработки с использованием высокочастотных (ультразвуковых) колебаний получили широкое практическое применение. Возбудить высокочастотные колебания при шлифовании можно путем применения прерывистых кругов.

Длину рабочего выступа прерывистого круга следует выбирать в соответствии с длительностью контакта τ , вытекающего из зависимости (15).

Эксперименты по определению температуры шлифования θ и тангенциальной составляющей силы резания P_z проводились для шлифования зубчатого колеса из стали 12Х2Н4А (твердость

поверхностного слоя зубьев HRC 60) с модулем $m = 8$ мм, с радиусом основной окружности $r_o = 110$ мм на зубошлифовальном станке МААГ по нулевой схеме на режимах: скорость круга $V_{kp} = 30$ м/с, число качаний стола $n' = 112$ кач/мин, продольная подача стола $S = 3,57 \cdot 10^{-3}$ м/кач, с глубинами резания $t_1 = 0,10 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 1 на рис. 3, 4), $t_2 = 0,06 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 2 на рис. 3, 4).

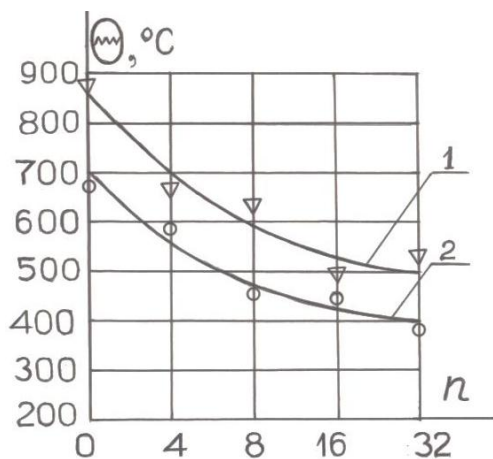


Рисунок 3 – Зависимость температуры шлифования Θ от количества прорезей n на рабочей поверхности абразивного круга

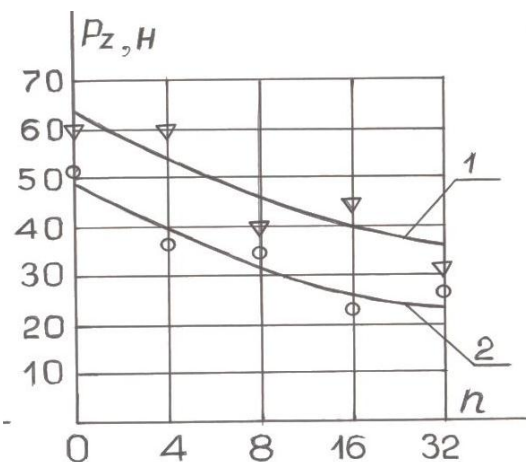


Рисунок 4 – Зависимость тангенциальной составляющей силы резания P_z от количества впадин n на прерывистом круге

Эксперименты проводились сплошным и прерывистыми абразивными тарельчатыми кругами 24A25CM26K (диаметр круга $D_{kp} = 220$ мм) с числом впадин на рабочей поверхности $n = 4, 8, 16, 32$ и шириной каждой впадины $l_2 = 10$ мм.

На рис. 3 показана зависимость температуры шлифования от числа впадин, прорезанных на рабочей поверхности абразивного тарельчатого круга (ширина каждой прорези $l_2 = 10$ мм). Из анализа графиков следует, что температуру поверхности при зубошлифовании прерывистым кругом можно снизить на 42 %. Из графиков видно, что с увеличением

количества прорезей на абразивном инструменте температура уменьшается. Снижение температуры при прерывистом шлифовании связано не только с периодическим прерыванием процесса резания. При работе прерывистым кругом в упругой системе станка возбуждаются высокочастотные колебания. Наличие колебаний изменяет состояние обрабатываемого материала в зоне резания, а именно: материал переходит в хрупкое состояние и тем самым уменьшается работа пластической деформации [2]. Кроме того, высокочастотные колебания способствуют уменьшению сопротивления сходу стружки, так как трение покоя заменяется трением движения [3]. Тангенциальная составляющая P_z силы резания при шлифовании прерывистыми кругами меньше, чем при сплошном шлифовании.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости $P_z = f(n)$, построенные для двух режимов шлифования. Из графиков видно, что чем больше прорезей на абразивном круге, тем меньше P_z . Это можно объяснить тем, что прерывистый круг работает в режиме систематического самозатачивания. Снижение сил при прерывистом шлифовании можно также объяснить наличием высокочастотных вынужденных колебаний, облегчающих процесс микрорезания: снижением теплонапряженности процесса шлифования и, как следствие, снижением вероятности адгезионного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом, а значит замедлением процесса затупления зерен. Кроме того, во впадинах прерывистых кругов хорошо размещается стружка, которая затем выбрасывается из них за счет инерционных сил.

Из работ [4-7] известно, что высокопористые шлифовальные круги способны значительно понизить температуру в зоне резания (до 40%) и сохранять высокую режущую способность во времени по сравнению с обычными кругами. Шлифовальные круги с большим количеством прорезей на рабочей поверхности (80-100) можно с некоторым допущением считать высокопористыми кругами, главное достоинство которых состоит в том, что такие круги легче изготавливать по сравнению с прерывистыми кругами.

Выводы. 1. Установлено, что амплитуда колебаний, возникающих при шлифовании прерывистыми кругами, зависит от величины отношения

времени работы режущего выступа круга τ к периоду собственных колебаний T упругой системы. Уменьшая величину этого отношения, можно существенно уменьшить амплитуду колебаний.

2. Экспериментально установлена закономерность уменьшения температуры и тангенциальной составляющей силы резания при возрастании числа прорезей на прерывистом шлифовальном круге.

3. Выдвинуто и обосновано предположение о целесообразности замены прерывистых кругов высокопористыми абразивными кругами.

Список використаних джерел: 1.Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара /Я.Г. Пановко //4-е изд. – Л.: Политехника, 1990. – 272с. 2. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов /А.И. Марков // М.: Машиностроение, 1980. – 237с. 3. Свирищев, В.И. Повышение эффективности процессов шлифования путем управления условиями динамического взаимодействия инструмента с деталью /В.И. Свирищев //Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1983. – С.30-36. 4. Елисеев Ю.С., Солодухин Н.Н., Новиков В.С., Старков В.К., Рябцев С.А., Торопцев М.В. Шлифование зубчатых колес и соединений высокопористыми кругами //Технология машиностроения, 2001. №6. – С. 15-18. 5. Поклад В.А., Новиков В.С., Жуков Ю.И., Старков В.К., Рябцев С.А. Производственные испытания высокопористого эльборового круга при профильном шлифовании зубчатых колес //Технология машиностроения, 2006. №5. – С. 27-31. 6. Старков В.К., Рябцев С.А., I. Fromar, P. Fryc. Высокопористый абразивный инструмент для профильного шлифования зубчатых колес //Research and Development in Me Banja, 2002., Т.1. – С.21-26. 7.Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: «Машиностроение», 2007. – 688 с.

Bibliography (transliterated): 1.Panovko, Ja.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara /Ja.G. Panovko //4-e izd. – L.: Politehnika, 1990. – 272s. 2. Markov, A.I. Ul'trozvukovaja obrabotka materialov /A.I. Markov //M.: Mashinostroenie, 1980. – 237s. 3. Svirshhev, V.I. Povyshenie jeffektivnosti processov shlifovanija putem upravlenija uslovijami dinamicheskogo vzaimodejstvija instrumenta s detal'ju /V.I. Svirshhev //Sovershenstvovanie processov abrazivno-almaznoj i uprochnjajushhej tehnologii v mashinostroenii. Perm': Permskij politehn. in-t, 1983. – S.30-36. 4. Eliseev Ju.S., Soloduhin N.N., Novikov V.S., Starkov V.K., Rjabcev S.A., Toropcev M.V. Shlifovanie zubchatyh koles i soedinenij vysokoporistymi krugami //Tehnologija mashinostroenija, 2001. №6. – S. 15-18. 5. Poklad V.A., Novikov V.S., Zhukov Ju.I., Starkov V.K., Rjabcev S.A. Proizvodstvennyye ispytaniya vysokoporistogo jel'borovogo kruga pri profil'nom shlifovanii zubchatyh koles //Tehnologija mashinostroenija, 2006. №5. – S. 27-31. 6. Starkov V.K., Rjabcev S.A., I. Fromar, P. Fryc. Vysokoporistyj abrazivnyj instrument dlja profil'nogo shlifovanija zubchatyh koles //Research and Development in Me Banja, 2002., Т.1. – С.21-26. 7.Starkov V.K. Shlifovanie vysokoporistymi krugami. M.: «Mashinostroenie», 2007. – 688 s.